



Agnes, Svante und der Klimawandel

PETRA MISCHNICK

Institut für Lebensmittelchemie, TU Braunschweig, p.mischnick@tu-braunschweig.de

Braunschweig, 1882. - Die zwanzigjährige Agnes Pockels steht in der heimischen Küche in der Casernenstraße 18.¹ Sie hat mit der von ihr entwickelten Schieberinne eine reine Wasseroberfläche hergestellt und mit Öl definiert verschmutzt. Nun misst sie mit einer kleinen Balkenwaage die Kräfte, die erforderlich sind, um eine auf der Oberfläche aufliegende, an einem Faden mit der Waage befestigte glatte Scheibe von der Flüssigkeitsoberfläche abzureißen. Die wieder einmal bettlägerige Mutter ruft nach ihr. Agnes kann noch schnell den letzten Messwert notieren, bevor sie den Stift aus der Hand legt und zu ihrer Mutter eilt.

So ähnlich mag es gewesen sein. - Wir wissen nicht, in welchem Wechsel sich für **Agnes Pockels** (Abb. 1, 1862-1935) das Experimentieren und das autodidaktische Studium theoretischer Grundlagen auf der einen Seite und auf der anderen Seite die Führung des Haushalts und die Pflege der Eltern abgespielt haben. Aus ihren knappen Einträgen in ihren „Lebensereignissen“² geht hervor, dass ihre Pflichten als Tochter dem Experimentieren, den akribischen und systematischen Untersuchungen zur Anomalie der Wasseroberfläche, häufig im Wege standen. Dennoch hat sie bis 1891 so viele Daten und Erkenntnisse gesammelt, dass sie diese – ermutigt durch ihren jüngeren Bruder Fritz (Friedrich Pockels, 1865-1913), zu der Zeit Assistent am Physikalischen und Mineralogischen Institut der Universität Göttingen, an den Physiker Lord Rayleigh schickt. Rayleigh, der 1904 den Nobelpreis für Physik erhalten wird, arbeitet in Cambridge auf ähnlichem Gebiet. Sie hat Mitteilungen über seine Publikationen³ in der von ihr seit 1890 abonnierten² Naturwissenschaftlichen Rundschau gelesen.



Abb.1. Agnes Pockels (1862-1935), gemalt von ihrer Tante Caroline Pockels



Lord Rayleigh ist offensichtlich ein anständiger Wissenschaftler. Er ignoriert nicht etwa die Informationen, die ihm ein formal nicht qualifiziertes Fräulein aus Deutschland als Ergebnis ihrer Küchenexperimente schickt. Er erkennt deren Bedeutung und hält sich sogar „ohne Not“ an die Gute Wissenschaftliche Praxis, indem er sich Agnes Erkenntnisse nicht etwa einfach aneignet, sondern für eine deren Bedeutung angemessene Publikation in *Nature* sorgt.⁴ Eine fruchtbare Korrespondenz beginnt. Weitere Arbeiten in *Nature* folgen.⁵ Auch die „Entdeckungen und Untersuchungen zur Oberflächenchemie“ Irving Langmuirs (1881-1957), für die dieser 1932 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wird, sind unter Nutzung einer Weiterentwicklung des Pockelsschen Trogs, der von ihr 1882 konstruierten Schieberinne, entstanden. Nach dem Einstellen ihrer experimentellen Arbeiten zum Beginn des 1. Weltkriegs bleibt sie fachlich am Ball, wie eine in *Science* 1926 publizierte Zuschrift von ihr auf eine dort erschienene Arbeit auf ihrem Forschungsgebiet zeigt.⁶ 1932 erfährt sie eine späte Anerkennung und Ehrung durch die Verleihung des Laura-Leonard-Preises der Deutschen Kolloid-Gesellschaft und der Ehrendoktorwürde der TH Braunschweig, die erste und bis mindestens 2007 einzige an eine Frau durch diese Institution.⁷ Der Leipziger Kolloid-Chemiker Wolfgang Ostwald⁸ würdigt ihre wissenschaftlichen Verdienste in der Kolloid-Zeitschrift in einem Beitrag, der auch einige von Agnes Pockels erbetene, im Duktus der Bescheidenheit verfasste persönliche Angaben enthält.⁹

Zur Erinnerung an diese besondere Braunschweiger Wissenschaftlerin hat die TU Braunschweig, abgesehen von der nach ihr benannten Auszeichnung und des ihren Namen tragenden Labors, 2017 ein Agnes-Pockels-Junior Fellowship ins Leben gerufen, um hochqualifizierten Forscher*innen-Nachwuchs an die TU zu locken.¹⁰ Auch die Universität Freiburg hat ein Agnes Pockels Junior Research Group Program für Wissenschaftlerinnen aufgelegt.¹¹ Seit 2020 verleiht die Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie den Agnes-Pockels-Doktorandenpreis.¹² Straßen sind nach ihr benannt, wenn auch nicht in Braunschweig. Über sie ist viel geschrieben worden. Hinsichtlich weiterer Details aus ihrem Leben und ihrer Forschung sei daher auf diese Aufsätze verwiesen.^{9,13} – Diese kurzen Ausführungen sollen genügen, um zu verstehen, dass sie die ideale Namensgeberin für das 2002 gegründete SchülerInnen-Labor für Chemie an der TU Braunschweig ist.¹⁴

Das Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor

Gegen Ende des letzten Jahrhunderts waren die Studienanfängerzahlen in der Chemie bedenklich gesunken. Nackte Zahlen und ihre abschbaren Konsequenzen aktivieren oft leichter zum Handeln als moralische Argumente. Der Nachwuchsmangel half, den Blick stärker auf die Frauen als nicht ausgeschöpftes Potenzial für die MINT-Fächer zu richten. Die verschiedenen Umstände, darunter auch ein Imageproblem der Chemie, und Motive sowie ihr Zusammenwirken sollen hier nicht weiter behandelt werden. Zu konstatieren ist, dass allerorten Schülerlabore gegründet wurden, v.a. an Universitäten aber auch an außeruniversitären Forschungseinrichtungen und in der Industrie. Hands-on-Experimentierstätten wie das phäno in Wolfsburg entstanden. Die Initiative der Autorin dieses Beitrags, die 2002 zur Gründung des später Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor genannten Labors für Chemie führte, war motiviert von der Überzeugung, dass man Mädchen stärker für die Chemie oder allgemein für die Naturwissenschaften interessieren kann, indem man ihnen die Möglichkeit bietet, diese, jenseits der gängigen Klischees, experimentierend für sich zu entdecken. Dabei standen die Angebote des Labors immer auch Jungen offen, da ja Schulklassen eingeladen waren, diese wahrzunehmen. Aus der Forschung war damals bekannt, dass zum einen der Kontext naturwissenschaftlicher Fragestellungen und die Sinnfrage – kann ich damit Gutes tun? – für die Motivation von Mädchen eine größere Rolle spielen als bei Jungen, zum anderen, dass sich bei Mädchen bis zum damals noch relativ späten Einsetzen des Chemieunterrichts an den Schulen durch gängige Geschlechter-



Stereotype bereits eine eher negative Selbsteinschätzung hinsichtlich ihrer naturwissenschaftlichen Fähigkeiten verfestigt hatte. – Agnes Pockels stand hingegen für eine starke intrinsische Motivation eines Mädchens respektive einer jungen Frau, die sich gegen alle Hindernisse ihrer Zeit autodidaktisch so intensiv und ausdauernd gebildet und mit ihrer selbst gebauten Apparatur zu Hause experimentiert hatte, dass sie uns letztlich grundlegende Erkenntnisse von nachhaltiger und internationaler Bedeutung hinterlassen hat. Zu den Hindernissen zählten die dürftigen naturwissenschaftlichen Lehrinhalte im Schulunterricht – sie besuchte die Städtische Höhere Mädchenschule in Braunschweig (heute Gymnasium Kleine Burg), kein Abitur für Mädchen – die Möglichkeit entstand erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts, keine Zulassung zum Studium (Frauen durften sich in Preußen erst ab 1908 immatrikulieren). Ein Angebot von Prof. Voigt von der Universität Göttingen, 1893, das Labor im Physikalischen Institut zu nutzen, schlug sie aufgrund ihrer Pflichten gegenüber den Eltern aus.^{2,9}

Um also die Mädchen nicht schon im Vorfeld zu verlieren, formulierte ich für unser Experimentierangebot das Motto „Früh beginnen“, d.h. Experimentieren auch für die Grundschüler*innen und sogar für Kita-Kinder anzubieten. Es ging mir um die grundlegenden Phänomene, darum, naturwissenschaftliches Denken und Vorgehen zu verinnerlichen wie man auch Schwimmen und Radfahren lernt. Damit sollte auch dem hartnäckigen Klischee von „Natur“ und „Chemie“ als Gegensätzen entgegengewirkt werden. Allerdings hat sich die Verbreitung von Mythen und Fake News, von Behauptungen, die von keiner Sachkenntnis getrübt sind, inzwischen nicht zuletzt durch das Internet rasant verbreitet. Ob wir dagegen etwas ausrichten können, ist nicht zu beantworten. Dabei scheint es sich ja nicht primär um ein Bildungsdefizit zu handeln. Wer neugierig auf seine Umwelt ist, soll jedoch die Möglichkeit haben, das wissenschaftliche Vorgehen – das Formulieren einer Frage, Finden einer Hypothese, Entwerfen eines Experiments zu deren Überprüfung, Beobachtung, Dokumentation, Auswertung und Interpretation im Kontext des Bekannten – in vereinfachter Form kennenzulernen. Raum bietet sich dafür v.a. in den seit 2007 wöchentlich stattfindenden Arbeitsgemeinschaften des Labors, die man über Jahre besuchen kann – wie in einem Sportverein.

Das Labor ist allmählich gewachsen. 2009 wurden Räumlichkeiten am Okerufer 2 bezogen, so dass das Angebot ausgebaut werden konnte. Ca. 4.200 Besuche sind seitdem jährlich zu verzeichnen, von Kindern und Jugendliche aller Schultypen inklusive Kitas wie auch von Referendar*innen, an Vormittagen die Schulklassen, nachmittags Anfänger*innen-, Fortgeschritten- und Forscher*innen-AGs, beginnend mit Klasse 4. Neben dem Angebot vor Ort stehen Experimentierkästen zu verschiedenen Unterrichtsthemen zum Verleih bereit, um Lehrkräfte bei der Durchführung von Schülerexperimenten im Unterricht zu unterstützen. Das Team und weitere Informationen findet man auf der Homepage des Labors.¹⁵

Die Themen waren spannend („Dem Täter auf der Spur“ – bis heute ein Renner) bzw. hatten Alltagsbezug: Lebensmittel, Farben, Pflanzen, Makromoleküle (Architektur und Struktur-Eigenschaftsbeziehungen von Biopolymeren und Kunststoffen, Recycling), Elektrochemie, Wasser u.v.a.m. Seit 2010 kamen Projekte gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) hinzu: zu Nachhaltigkeit, Energie, gegen Verschwendung von Lebensmitteln, alles gesellschaftliche Fragen, für die naturwissenschaftliches Verständnis hilfreich ist. Was lag also näher, als sich nun endlich auch mit dem Thema „Klimawandel“ zu befassen. Das hatten natürlich schon viele andere vor uns getan.¹⁶ Nicht verwunderlich, denn eine erste Abschätzung, welche Auswirkung die atemberaubend schnelle Verbrennung der über Jahrtausende entstandenen fossilen Energieträger Kohle, Öl und Erdgas zu Wasser und Kohlenstoffdioxid auf die globale Temperatur haben würden, war bereits 1896 von einem Zeitgenossen Agnes Pockels' publiziert worden.¹⁷



Ein Zeitgenosse Agnes Pockels': Svante Arrhenius

Stockholm, 1882. – Der dreiundzwanzigjährige Svante Arrhenius hat vor einem Jahr sein Studium der Mathematik und Naturwissenschaften an der Universität in seiner Heimatstadt Uppsala abgeschlossen. Nun arbeitet er in einem privaten Forschungsinstitut, aus dem die Universität Stockholm hervorgehen wird, an seiner Dissertation über die Dissoziation von Salzen in Wasser. Er steht im Institut von Edlund im Labor und konzentriert sich ganz und gar auf seine Messungen der Leitfähigkeit von Kochsalzlösungen.

So könnte 1882 ein Tag des Doktoranden **Svante August Arrhenius** (Abb. 2, 1859-1927) ausgesehen haben. Im Gegensatz zu Agnes Pockels standen ihm die Bildungseinrichtungen offen. Er konnte eine höhere Schulbildung genießen (1876 Abitur), studieren (Abschluss 1881 in Uppsala) und promovieren (1884).



Abb. 2. Svante Arrhenius¹⁸

Ausgestattet mit einem Reisestipendium der Schwedischen Akademie der Wissenschaften verbrachte er die folgenden Jahre bei führenden Vertretern der noch jungen Physikalischen Chemie, u.a. bei Wilhelm Ostwald⁸ im russischen Riga und später in Leipzig, bei Kohlrausch in Würzburg, bei Boltzmann in Graz und bei van't Hoff in Amsterdam, bevor er 1891, im Jahr der ersten Publikation von Agnes Pockels in *Nature*, eine Stelle an der Universität Stockholm antrat. Nachdem er 1903 den Nobelpreis für Chemie erhalten hatte, wurde er 1905 Professor am eigens geschaffenen Nobel-Institut für Physikalische Chemie.

Arrhenius ist Chemiker*innen vor allem durch die Arrhenius-Gleichung für die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen bekannt. Er verfolgte jedoch – wie damals noch möglich und häufig der Fall – universellere Forschungsinteressen, die die physikalische Chemie, die damals kosmische Physik genannten Gebiete bis hin zur Physiologie umfassen.¹⁹ Seine in den 1890er Jahren erschienenen Arbeiten liegen v.a. auf dem Gebiet der physikalischen Meteorologie, der Veränderung der Atmosphäre.²⁰ Im Rahmen dieser Arbeiten



hatte Arrhenius 1896 wie oben bereits erwähnt den Effekt einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf die Temperatur unter Berücksichtigung der Eis-Albedo-Rückkopplung erstmals berechnet.¹⁷ Qualitativ hatte dieses erst später *greenhouse effect* bzw. *Treibhauseffekt* genannte Phänomen bereits Fourier 1824 entdeckt, 1856 Eunice Foote als erste die Erwärmung verschiedener Gase unter Sonneneinstrahlung verglichen,²¹ 1862 Tyndall die Messung der IR-Absorption von Luft, Kohlenstoffdioxid und Ozon beschrieben,²² um nur einige Pionier*innen auf dem Weg der Entdeckung des Treibhauseffekts zu nennen. Arrhenius' Berechnung hatte Unzulänglichkeiten, aber im Grundsatz hatte er Recht.

Der Klimawandel

Es ist hier nicht der Ort, die Geschichte der Klimawandelforschung nachzuzeichnen oder gar zu bewerten. Als Naturwissenschaftlerin weiß ich jedoch, wie sich Wissenschaft entwickelt, wie ihre wechselseitige Selbstkontrolle funktioniert, dass neue Erkenntnis erst einmal vorläufig ist, dass sie sich erhärten oder auch widerlegt werden kann, revidiert werden muss, sich oft einfach weiter differenziert, verfeinert, entwickelt. Und wie dies konkret verläuft, wird jeweils auch von der Fachdisziplin, von der Fachkultur und -historie geprägt. Durch neue Technologien und Messmethoden sind mitunter sogenannte Quantensprünge, rasante Fortschritte möglich. In vielen Bereichen, so auch der Klimaforschung, hängen diese direkt oder indirekt mit der Entwicklung der Computertechnologie zusammen, mit der ungeheuren Rechenleistung und Miniaturisierung, mit dem technischen Fortschritt der Messtechnik. Infolge sind Messungen, die Sammlung und Übermittlung von Daten oder quantitative Analysen in zuvor kaum denkbarem Umfang und hoher Dichte, mit gesteigerter Auflösung, Genauigkeit und Sensitivität und folglich bei gleichzeitig immer geringer werdendem Materialbedarf möglich geworden. All dies hat in den letzten Dekaden ungeahnte Horizonte eröffnet, hat die retrospektive Konstruktion von CO₂-Daten und Temperaturen (Proxy-Daten) über tausende von Jahren und so die Verfeinerung von Modellen ermöglicht. Folglich stehen inzwischen sehr viel mehr konkrete Parameter zur Verfügung, mit denen man Klima-Modelle füttern kann, während man diese z.B. in den 80er Jahren teils noch ohne physikalische Grundlage wählen bzw. schätzen musste, damit das Modell keine unrealistischen Zustände einnahm.

Da Klima ein komplexes System darstellt, in dem sich die Variation eines Parameters nicht einfach linear auf andere Größen auswirkt (Stichwort: positive Rückkopplungseffekte, Kipp-elemente), kann man sich leicht vorstellen, dass die Annahme falscher Ausgangsbedingungen und Dynamiken zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Dies spiegelt sich auch in den jahrzehntealten Kontroversen über die qualitativen und quantitativen Auswirkungen von Effekten wider. Der Schwede Svante Arrhenius konnte der von ihm auf damaliger Wissensgrundlage berechneten Erwärmung noch etwas Positives abgewinnen¹⁷ – freut man sich doch gerade im Norden über die warme Sommerzeit. Wenn auch der anthropogene CO₂-Eintrag durch die Verbrennung über Jahrtausende entstandener fossiler Brennstoffe in kürzester Zeit unmittelbar einleuchtend und durch die ab 1958 von Keeling etablierten systematischen und exakten CO₂-Messungen im Verbund mit Kohlenstoffisotopenanalysen belegt ist, und auch die Wechselwirkung von CO₂ mit IR-Strahlung längst bekannt war (s.o.), war 1990 dennoch nicht evident, welches Vorzeichen die resultierende Klimaveränderung haben würde. Zu groß war noch die Unsicherheit von in Modellierungen gesteckten Annahmen, zu „grob“ die Modelle in Hinblick auf all die zu bedenkenden Effekte wie z.B. dem Einfluss von hellen und dunklen Aerosolen auf die Albedo, die Auswirkung der Wasserdampfdruckkopplung und Wolkenbildung und viele Fragen mehr.²³



Das 1988 gegründete *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) maß mit jedem neuen Bericht (1990, 1996, 2001, 2007, 2013, Sonderberichte 2018/2019) der jeweils noch etwas vageren Aussage des Vorgängerberichts hinsichtlich des menschengemachten Klimawandels mehr Evidenz bei, so im 4. Bericht von 2001 eine oberhalb von 90 % liegende Wahrscheinlichkeit. Im 5. Bericht von 2013 heißt es dann „extrem wahrscheinlich“. Wie schon in den Jahrzehnten zuvor, blieben die Aussagen Gegenstand kontroverser wissenschaftlicher aber auch politischer Diskussionen, wenn auch die Zahl der wissenschaftlich orientierten Skeptiker immer weiter abnahm. Gerade deshalb sind die zugrundeliegenden Studien besonders intensiv auf Fehler und Plausibilität überprüft und letztlich durch weitere Studien und immer umfassendere Messdaten in ihrer Aussage bestätigt und sogar durch die Realität teils ein- und überholt worden, ein Prozess, der sich v.a. in den letzten 20 Jahren vollzogen hat.²³

Das Konzept: Labor-Versuche zum Thema Klimawandel

Wieder führt die Spur nach Schweden, nun zu einer damals 15-jährigen Schülerin, Greta Thunberg, die im August 2018 mit ihrem Schulstreik für das Klima die in besonderer Weise betroffene junge Generation mobilisierte. Infolge ist eine weltweite Bewegung entstanden. Zu den Schüler*innen und Student*innen von *Fridays for Future* (FFF) kamen durch einen Aufruf im März 2019 die *Scientists for Future* (S4F), die auch an der TU Braunschweig aktiv sind.²⁴

Die sehr komplexen naturwissenschaftlichen Hintergründe zu Klimafragen sind selbst für Naturwissenschaftler*innen anderer Disziplinen, aber erst recht für Kinder und Jugendliche nicht so leicht zu erfassen. Also begannen wir am Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor über Experimente nachzudenken, mit denen diese einige zentrale Phänomene in Laborversuchen selbst beobachten können sollten.²⁵ – Zum Einsatz sollten dabei Minicomputer mit diversen Messsonden kommen.^{26,27} Neben Vorversuchen zu Quellen von CO₂ und seinen Eigenschaften (temperaturabhängige Löslichkeit, saure Reaktion, Absorption von IR-Strahlung) geht es darin um dessen Auswirkungen: Schädigung kalkhaltiger Organismen, Treibhausgaseffekt → globale Erwärmung → Gletscherschmelze und Rückkopplungsmechanismen wie die Abnahme der CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane infolge Erwärmung sowie die Eis-Albedo-Rückkopplung. Diese Versuchsvorschriften und Hintergrundinformationen werden nach Erprobung auf der Homepage des Agnes-Pockels-Labors¹⁵ zum Download bereitgestellt. Dort findet man bereits ein umfangreiches Angebot von Versuchsvorschriften und erläuternden Hintergrundinformationen zu o.g. Themen, seit der Pandemie-bedingten Schließung im März 2020 auch „Experimente der Woche“ für die Durchführung zuhause oder auch zur Unterstützung digitalen Unterrichts. Hier möchte ich einige grundlegende Probleme aufzeigen, die uns erst im Rahmen der Ausarbeitung der Versuche zum Klimawandel nach und nach bewusst wurden.

Es gibt nämlich eine grundlegende Besonderheit, die Karl-Heinz Glaßmeier in seinem Beitrag in diesem Band²⁸ gleich eingangs anspricht: Im Bereich der geophysikalischen Forschung ist die Natur das Labor. Man kann das Erdsystem – im Gegensatz zu kleiner dimensionierten und abgrenzbaren Forschungsgegenständen – nicht auf Labordimension runterskalieren. Hinzu kommt die Zeitskala, auf der sich Veränderungen abspielen. Bei der globalen Klimaveränderung geht es um langfristige Betrachtungen, die sich über Zeiträume von Jahrzehnten, Jahrhunderten, Jahrtausenden erstrecken, ja infolge natürlicher Schwankungen erst nach Beobachtung über längere Zeiträume überhaupt Aussagekraft gewinnen können. Ein Experiment für Schüler*innen muss aber auf einer Zeitskala von Minuten ablaufen. Man darf also von Anfang an nicht den Anspruch erheben, den Klimawandel selbst „in Klein“ im Laborversuch im Zeitraffer nachstellen zu wollen. Ein weiteres Problem ist, dass sich Klimaauswirkungen nicht aus einem



zeitlich und räumlich begrenzente Experiment ableiten lassen, sondern, wie es in der MPI-Broschüre²⁹ zur Partnerschaft Erdsystemforschung heißt, der numerischen Modellierung bedürfen: *„Modellierung ist die einzige „Sprache“, in der sich die komplexen Prozesse im System Erde und seinen Komponenten qualitativ und quantitativ ausdrücken lassen. Aufgrund der vielfachen Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Erdsystem entzieht sich die Analyse der Auswirkungen von „Störungen“ (z. B. Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, Landnutzungsänderung oder Brandrodung) oft einer linearen und intuitiven Analyse, und häufig treten scheinbar paradoxe Effekte auf. Diese vielfachen Wechselwirkungen lassen sich nur mit Hilfe von Modellen adäquat untersuchen.“*²⁹

Neben der Berücksichtigung dieser spezifischen Randbedingungen, die sich aus dem „Gegenstand“ der Untersuchung ergeben, kann man die Planung eines Experiments noch einmal anders betrachten. Will ich bei einer chemischen Reaktion z.B. den Einfluss der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit untersuchen, dann werde ich geeignete Ausgangsbedingungen wählen und die Temperatur variieren, alle anderen Reaktionsparameter aber konstant halten. Ich verfolge die Produktbildung z.B. über ein charakteristisches spektroskopisches Signal nach verschiedenen Reaktionszeiten bei der jeweils gewählten Temperatur. Aus den Ergebnissen kann ich dann die jeweilige Geschwindigkeitskonstante und – nach der Arrhenius-Gleichung – die Aktivierungsenergie berechnen. Ich werde mein Experiment so komplex wie nötig, aber so einfach wie möglich gestalten, um später eindeutige Schlüsse hinsichtlich des mich interessierenden Parameters ziehen zu können. Je komplexer mein Aufbau, desto mehr Fehlerquellen, potenzielle nicht kontrollierte Einflussfaktoren gibt es – all dies macht mein Experiment weniger robust. Unter diesem Blickwinkel ergibt sich für Laborversuche zum Klimawandel eine andere Zielsetzung: die Beobachtung der dem komplexen Geschehen „Klimawandel“ zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Phänomene. Wir können uns nur Puzzleteile angucken, nicht das gesamte Bild, nur zwei Zahnräder, die ineinandergreifen, nicht die ganze Maschine. Und die müssen wir quasi in unser Experiment „einsperren“, während das Universum offen ist. Der Anspruch des Laborexperiments muss also von Anfang an bescheidener formuliert, anders akzentuiert werden.

Eine andere bereits angesprochene Herausforderung besteht darin, Effekte, die in der Natur erst über einen langen Zeitraum erkennbar sind, so zu forcieren, dass sie fast in Echtzeit beobachtet werden können. Diese Herausforderung ist in den Materialwissenschaften gut bekannt, wenn es darum geht, Materialermüdungen abzuschätzen. Jede*r kennt wahrscheinlich diese Maschinen, die in Möbelhäusern immer wieder in einen Sessel stampfen, um zu demonstrieren, dass dieser auch nach jahrelanger Beanspruchung noch nicht durchgesessen ist. Geht es um Umwelteinflüsse, deponiert man Materialien in Klimakammern, die die zu erwartende thermische, atmosphärische und Strahlungsbelastung im Zeitraffer durchspielt. - Wir müssen also auch maßlos übertreiben, um messbare Effekte zu zeigen. Das kann man machen, aber in unserem Fall sind naturwissenschaftlich noch unerfahrene Kinder und Jugendliche die Zielgruppe. Man darf nicht vergessen, diesen Kompromiss mit seinen Unzulänglichkeiten zu thematisieren, um falsche Schlussfolgerungen zu vermeiden.

Hierzu ein Beispiel: die Ozeanversauerung durch die verstärkte Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre. Die Ozeane nehmen einen erheblichen Teil des anthropogen erzeugten CO₂ aus der Luft auf – wegen der temperaturabhängigen Löslichkeit insbesondere an den kälteren Polen, von wo es durch thermohaline Zirkulation weiter verteilt wird.^{16a,30} Durch vermehrte Aufnahme von CO₂ kommt es jedoch zur sogenannten Ozeanversauerung. Der mittlere pH des Ozeans liegt bzw. lag bei 8,2. Durch den anthropogenen CO₂-Anstieg ist er im globalen Mittel um 0,1 gesunken. Das ist auf der pH-Skala von 0-14 mit 7 als Neutralpunkt noch nicht im sauren Bereich (0 bis <7), aber relativ ist es eine Veränderung in Richtung „sauer“. Im Experiment für



die Schüler*innen wird nun in Leitungswasser so viel CO_2 eingeleitet, dass der pH auf ca. 6 sinkt, die Lösung also tatsächlich sauer wird. Der pH-Wert wird zum einen über die Farbänderung eines Universalindikators visuell verfolgt, aber auch mit Hilfe einer pH-Elektrode und den schon genannten Minicomputern aufgezeichnet. Im zweiten Teil des Experiments wird die CO_2 -gesäuerte Lösung erhitzt. Es soll gezeigt werden, dass die Wasserlöslichkeit des CO_2 temperaturabhängig ist, dass sie mit steigender Temperatur abnimmt. Das eingeleitete CO_2 wird also wieder ausgetrieben. Der pH steigt auf 7,9, wobei hier auf ca. 70°C erwärmt wird (Abb. 3). – Es ist klar, dass der Anstieg der mittleren Meeresoberflächentemperatur³¹ nicht 50°C beträgt, aber nur so ist der Effekt schnell und gut zu beobachten.

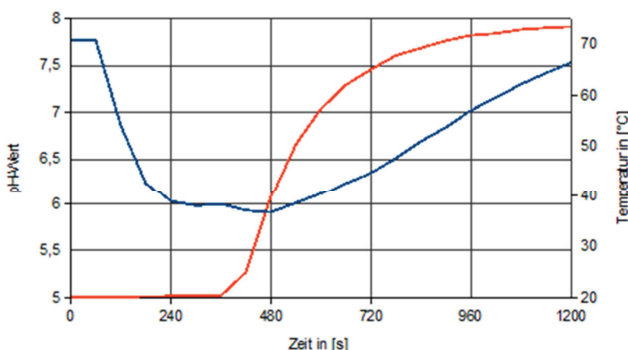


Abb. 3: Änderung des pH-Wertes (dunkle Linie) von Wasser nach dem Zusetzen CO_2 bei 20°C und anschließendem Erhitzen (Temperaturverlauf; helle Linie).

Weitere Experimente zeigen die Wirkung der „Kohlensäure“³² auf kalkhaltige Meeresorganismen (Kalkflagellaten, Seeigel u.ä.). – Die Schüler*innen könnten nun den Schluss ziehen, dass man wenigstens diese Schädigungen durch die globale Erwärmung verhindert, weil sich bei höherer Temperatur weniger CO_2 in den Ozeanen löst. Sie könnten allein durch den gängigen Begriff „Ozeanversauerung“, aber auch aufgrund der selbst aufgezeichneten pH-Verläufe annehmen, dass die Meere tatsächlich sauer werden. Hier ist Aufmerksamkeit geboten, solche Fehlschlüsse zu vermeiden. Wichtig ist hingegen, die positive Rückkopplung zu erkennen: Wird es wärmer, nehmen die Ozeane weniger CO_2 auf. Folglich verbleibt anteilig mehr CO_2 in der Atmosphäre, was wiederum die globale Erwärmung und damit auch die der Meere befördert, die ca. 90 % dieser Wärme aufnehmen.³³

Und damit sind wir beim sogenannten „Treibhauseffekt“, dessen Übersetzung in ein Laborexperiment besonders viele Fragen aufwirft. – Worum geht es? Dies soll hier kurz skizziert werden. Die elektromagnetische Strahlung der Sonne (Ultraviolett (UV) und sichtbarer Bereich) wird von der Erdoberfläche, lokal je nach Beschaffenheit, im Mittel zu ca. 70 % absorbiert und als längerwellige Infrarotstrahlung (IR) wieder abgegeben. Diese Abstrahlung in die Atmosphäre wird jedoch insbesondere durch Wasserdampf und Wolken (kondensierte Wassertröpfchen) geschwächt, u.a. indem die Wassermoleküle die von der Erde kommende gerichtete Strahlung absorbieren und isotrop wieder abgeben. Dadurch wird ein erheblicher Teil dieser Strahlung umgelenkt und verbleibt in der Troposphäre. Dieser „natürliche Treibhauseffekt“ beschert uns eine mittlere Temperatur von $+15^\circ\text{C}$ statt -18°C und macht so das Leben auf der Erde erst möglich. Während die Hauptbestandteile der Luft, Stickstoff und Sauerstoff, aus Sym-



metriegründen keine IR-Strahlung absorbieren können, finden wir in den sogenannten Klimagasen Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Ozon (O_3), Lachgas (N_2O), Fluorkohlenwasserstoffe (FCKWs) oder auch das zur Isolation in Transformatoren verwendete Schwefelhexafluorid (SF_6) Luftbestandteile, die IR-aktiv sind. Ihre Wirkung, die man im Gegensatz zum natürlichen als „anthropogenen Treibhauseffekt“ bezeichnet, hängt dabei jeweils von der Stärke und Lage ihrer Absorptionsbanden, ihrer Verweildauer in der Atmosphäre und natürlich ihrer Menge ab. Die Konzentration von CO_2 ist von vorindustriellen 280 ppm über ca. 310 ppm im Jahr 1955 auf inzwischen 410 ppm angestiegen (Abb. 4).³⁴

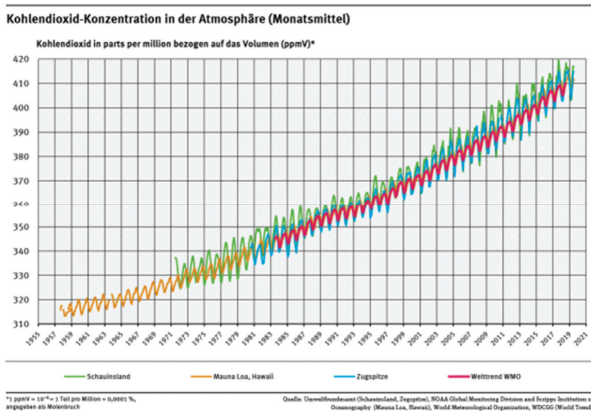


Abb. 4: Entwicklung der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre von 1955-2019.
Quelle: Umweltbundesamt³⁴

Anthropogene Quellen für CO_2 sind v.a. die Verbrennung von Kohle und Kohlenwasserstoffen für Mobilität und Heizen, die Landwirtschaft, aber auch die Stahlherstellung mit Kohle als Reduktionsmittel oder der Bausektor. Methanemissionen werden durch Wiederkäuer (v.a. Rinderhaltung), den nassen Reisanbau und generell durch aerobe Fäulnisprozesse verursacht und potentiell aus den Permafrostböden, aus denen der darin gespeicherte gasförmige Kohlenwasserstoff bei Auftauen freigesetzt werden wird.³⁵ Wir wollen aber hier beim bekanntesten und wichtigsten Klimagas CO_2 bleiben.

Der Name „Treibhauseffekt“ lässt an ein Gewächshaus denken, in dem es durch Sonneneinstrahlung zu einer relativen Erwärmung im Vergleich zur Außentemperatur kommt, zu einem „Einfangen“ der Wärme. Der Grund dafür ist hier jedoch ein anderer: Durch das IR-intransparente Glasdach (ab $\lambda = 2,8 \mu\text{m}$ entsprechend der Wellenzahl $1/\lambda = \tilde{\nu} = 3600 \text{ cm}^{-1}$) wird die Strahlung einerseits am Austritt gehindert, zum anderen behindert die Barriere den vertikalen Wärmeabfluss durch Konvektion. Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen, die mit Stoff- und Wärmetransport einhergehen (Konvektion) werden durch Dichteunterschiede verursacht. Diese können zum einen durch unterschiedliche Temperaturen desselben Stoffes oder, bei Gasen, die ja pro Mol dasselbe Volumen einnehmen, allein durch die molare Masse bedingt sein (CO_2 : 44, Luft: 29, Methan: 16 g/Mol; entsprechend unter Normalbedingungen Dichten von 1,96, 1,29 bzw. 0,71 g/L), bei Flüssigkeiten auch durch darin gelöste Stoffe, also in den Ozeanen durch die unterschiedlichen Salzgehalte von Süß- und Salzwasser. In der Troposphäre ist die Konvektion hingegen nicht derartig behindert. Der Treibhauseffekt basiert v.a. auf dem Absorptionsverhalten gegenüber der IR-Strahlung. Für ein Laborexperiment stellt man im Gegensatz



zum Erdsystem eine reine CO_2 -Atmosphäre her, um einen ausreichend großen Temperatureffekt im Vergleich zu Luft beobachten zu können. Schließt man diese Atmosphäre ein, kommen die genannten Gewächshauseffekte hinzu. Je nach Versuchsaufbau kann passieren, dass man zwar zu der gewünschten Beobachtung kommt, aber möglicherweise aus physikalisch anderen Gründen als man demonstrieren wollte. Wir haben daher bei unseren Experimenten auf einen Aufbau gesetzt, bei dem lediglich das in ein Becherglas gefüllte Gas variiert, alles andere wie Strahlungsquelle, Abstand und Einfallswinkel, Lokalisierung des Thermoelements etc. konstant gehalten wird. Dann sollten die für die beiden Gase beobachteten Temperaturunterschiede ausreichend reproduzierbar und allein auf das Gas – Luft oder CO_2 – zurückzuführen sein. Die Konvektion wird durch eine Abdeckung behindert. In einer einfachen Variante, bei der direkt mit einer IR-Quelle eingestrahlt wird, wird das mit dem Gas befüllte Becherglas mit einer Cellophanfolie verschlossen, die eine geringe Gasdurchlässigkeit besitzt. In einer komplexeren Variante wird zusätzlich eine Petrischale mit Wasser als Abdeckung gewählt, die für Wolken steht (Abb. 5). Eingestrahlt wird hier mit energiereicherer (kurzwelligerer) Strahlung, die „Sonne“ repräsentierend, die von einer dunklen Pappe am Becherglasboden („Erdboden“) absorbiert und als Wärmestrahlung abgestrahlt wird. Über eine Dauer von 30 Minuten wird die in Abb. 5 gezeigte Temperaturentwicklung beobachtet. Infolge der behinderten Konvektion kommt es unter den gewählten Bedingungen zu einem Temperaturanstieg um 15°C (Luft) bzw. 17°C (CO_2), also zu einer Differenz von 2°C .

Bezugnehmend auf einen Schüler*innenversuch zum Treibhauseffekt weisen Wagoner et al.^{16d} nach, dass der darin beobachtete Temperatureffekt beim Einleiten von CO_2 anstelle von Luft auf geringere Konvektion bei CO_2 infolge seiner höheren Dichte zurückzuführen ist (s.o.). Sie demonstrieren dies, indem sie ein Kontrollexperiment mit Argon durchführen, das wie CO_2 eine deutlich höhere Dichte als Luft besitzt.^{16d} In dem dort beschriebenen offenen Aufbau zeigt Argon etwa denselben Effekt wie CO_2 , obwohl es nicht IR-aktiv ist. Darüber hinaus wird zur Überprüfung die zu erwartende Größenordnung des Temperatureffekts berechnet und gezeigt, dass dieser wesentlich kleiner sein sollte als der beobachtete – auch dies immer ein sinnvolles Kontrollinstrument, um die Plausibilität eines Ergebnisses zu überprüfen.

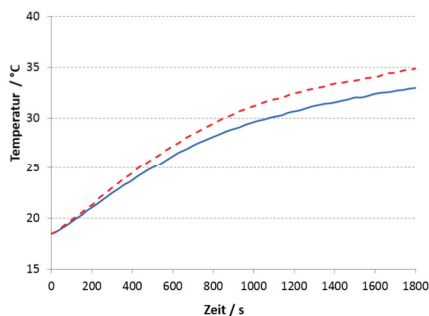


Abb. 5: Temperaturmessung von Luft (—) und CO_2 (---) bei Bestrahlung mit weißem Licht (Philips PAR38 EC, 120W). Links: Versuchsaufbau, rechts: Temperaturverlauf über 30 min.

Die amerikanische Wissenschaftlerin Eunice Foote (1819-1888) hat 1856 als erste die Erwärmung eingeschlossener Gase – trockene und feuchte Luft sowie Kohlenstoffdioxid – vergleichend untersucht,²¹ Experimente, auf die ich erst beim Schreiben dieses Aufsatzes aufmerksam geworden bin. Es ist ganz offensichtlich, dass bei ihr wie auch in unseren oben beschriebenen Experimenten die Unterbindung der Konvektion maßgeblich für den starken Temperaturanstieg der Gase ist. Wir sind jedoch zuversichtlich, dass dichtebedingte Konvektionsunterschiede



durch das Einsperren einheitlicher Gase, in denen sich keine Schichtung oder Gradient ausbilden wird, nicht zum Tragen kommen. Daher weisen wir in den Begleitmaterialien auch nachdrücklich darauf hin, dass der Aufbau exakt eingehalten werden muss und dass lediglich die beobachtete Temperaturdifferenz zwischen den beiden Gasen relevant ist.

Ein kritischer Parameter ist auch die Feuchtigkeit der Gase. Wie oben erwähnt, absorbiert Wasserdampf in einem weiten Bereich der IR-Strahlung. Wasserdampfemissionen selbst sind nicht relevant, weil dieser – anders als CO_2 – mit dem flüssigen Wasser im Gleichgewicht steht und nur kurz in der Atmosphäre verweilt. Allerdings gibt es eine Wasserdampfdruckkopplung durch eine CO_2 -getriebene Erwärmung, weil die Atmosphäre mit steigender Temperatur mehr Wasserdampf aufnehmen kann, der dann den Temperaturanstieg zusätzlich verstärkt.³⁶ Auch darauf muss je nach Umgebungsbedingungen geachtet werden.

Ein erster praktischer Einsatz der Versuche am Diakonie-Kolleg in Wolfenbüttel wurde mit Interesse aufgenommen und führte zur Sensibilisierung, Wissenszuwachs und kreativen Ideen. Weitere Erprobungen durch die das Agnes-Pockels-Labor besuchenden Schulen aus Braunschweig, von Peine bis Helmstedt, von Wolfsburg bis Wolfenbüttel, Goslar und Salzgitter warnten auf die Wiedereröffnung des Labors nach „Corona“.

Fazit

Anliegen dieses Aufsatzes war es, die von den Zeitgenossen Agnes Pockels und Svante Arrhenius ausgehenden Linien in den Klimawandelversuchen am Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor der TU Braunschweig zusammenzuführen. Beide waren Physikochemiker*innen, die bahnbrechende Pionierarbeiten auf diesem damals jungen Gebiet geleistet haben. Sie, die Autodidaktin, die einfallsreich und innengeleitet trotz aller Barrieren für Frauen ihrer Begabung folgte, dabei dennoch ihre „Tochterpflichten“ erfüllte. Er, der vielseitig interessierte und talentierte junge Wissenschaftler, dem die akademische Welt offenstand und der die Effekte von IR-aktiven Gasen auf die globale Temperatur erstmals berechnet hat. – Haben sie sich einmal persönlich getroffen? – Eher nicht. Aber von seinen Arbeiten, die auch in der von ihr seit 1890 abonnierten Naturwissenschaftlichen Rundschau besprochen sind,³⁷ dürfte sie Notiz genommen haben, und er vielleicht auch von ihren. Auch Agnes Pockels interessierte sich für Meteorologie, fürs Universum, für die „willkürlich gesetzten Bedingungen, die zusammen mit den Naturgesetzen das Geschehen bestimmen“, wie sie in ihren Ausführungen zum „Willkürlichen in der Welt“ in den Annalen der Naturphilosophie 1909 zum Ausdruck bringt.³⁸ Und Svante Arrhenius gilt als jemand, der mit seiner Reihe „Die Vorstellung vom Weltgebäude im Wandel der Zeiten“ ein populärwissenschaftliches Genre etabliert hat.¹⁹

Und nun, im Jahre 2020, bemühen wir uns in Agnes Namen, Mädchen die MINT-Fächer näher zu bringen und dies u.a. am Beispiel der Auswirkung von Kohlenstoffdioxid auf die Temperatur, die der Sohn von Carolina Christina Arrhenius, geb. Thunberg,³⁹ vor mehr als 100 Jahren publiziert hat. Dabei sollte insbesondere die Schwierigkeit in den Blick gerückt werden, eine solch komplexe Thematik wie das Klima mit seinen zeitlichen und räumlichen Dimensionen in Schülerexperimenten „einzufangen“. Dies kann meines Erachtens nur anhand der Demonstration einzelner physikalischer und chemischer Phänomene gelingen, die dann wiederum hinsichtlich ihrer Bedeutung und Interaktion in den großen Zusammenhang gestellt werden müssen.



Zum Schluss noch eine persönliche Anmerkung:

Ich habe das Agnes-Pockels-Labor für Chemie seit 2002 aufgebaut und über die Jahre weiterentwickelt. Dabei konnte ich mich immer auf viele treue kompetente und engagierte Mitarbeiterinnen¹⁵ stützen, die für Qualität, Verlässlichkeit und ein gutes Arbeitsklima gesorgt haben. Allen, die Mitglieder des Teams waren oder sind, möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich danken, ebenso der TU Braunschweig für die Bereitstellung der Räumlichkeiten und die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Schule-Uni-Projekte (check-in⁴⁰).

Mit meinem Eintritt in den Ruhestand habe ich das Labor zum 01.09.2020 an den Kollegen Prof. Christoph Jacob und Frau Dr. Insa Stamer (wissenschaftliche Leitung) übergeben⁴¹ und wünsche ihnen für ihre Arbeit viel Freude und Erfolg.

Quellen und Anmerkungen

1. Heute dem Grundstück Kasernenstr. 7 entsprechend. Dort lebte Fam. Pockels von 1873/74 bis 1922/23, vorher ab 1871 Büldenweg 9, Agnes Pockels danach in der Hagenstraße 34 (heute Steinbrecherstr. 34) bis zu ihrem Tod im 2. OG (Auskunft von Herrn Wulle, Archiv TU BS, anhand der Braunschweiger Adressbücher)
2. Archiv der Technischen Universität Braunschweig, „Lebensereignisse von Agnes Pockels“ (bis 1907)
3. (a) Lord Rayleigh: Ueber die Spannung frisch gebildeter Flüssigkeits-Oberflächen *Naturwiss. Rundsch.* 5 (1890) 459-460; (b) Lord Rayleigh: Ueber die oberflächliche Zähigkeit des Wassers, *Naturwiss. Rundsch.* 5 (1890) 587-589.
4. Agnes Pockels. Surface Tension. *Nature* 43 (1891) 437-439.
5. (a) Agnes-Pockels. On the relative contamination of the water surface by equal quantities of different substances. *Nature* 46 (1892) 418-419; (b) Agnes Pockels. On the relations between the surface-tension and relative contamination of water-surfaces. *Nature* 48 (1893) 152-154; (c) Agnes Pockels. On the spreading of oil upon water, *Nature* 50 (1894) 223-224.
6. Agnes Pockels. The measurement of surface tension with the balance. *Science* 64, 1926, 304.
DOI: 10.1126/science.64.1656.304.
7. Deren Anteil liegt deutschlandweit bei 0-5%. s. „Frau Dr. h. c. Unerwünscht!“ von Sarah Marak und Heike Paul, November 2020, 16:53 Uhr Editiert am 16. November 2020, 15:55 Uhr DIE ZEIT Nr. 47/2020, 12. November 2020, <https://www.zeit.de/2020/47/gleichstellung-frauen-wissenschaft-ehrendoktoruerde-gender-gap-universitaet> (Zugriff am 08.12.2020)
8. Der Professor für Kolloidchemie an der Universität Leipzig Wolfgang Ostwald (1883-1943) war der Sohn von Wilhelm Ostwald (1853-1932), Mitbegründer der Physikalischen Chemie, Nobelpreisträger für Chemie von 1909 und „Entdecker“ Svante Arrhenius⁴, mit dem ihn eine lebenslange Freundschaft verband, die sich auf beide Familien und über Generationen erstreckte (persönliche Mitteilung der Enkelin Wilhelm Ostwalds Gretel Brauer (1918-2008), Großbothen, 2005).
9. Wolfgang Ostwald. Die Arbeiten von Agnes Pockels über Grenzschichten und Filme. *Kolloid-Zeitschrift* 58, 1932, 1-8.
10. <https://www.tu-braunschweig.de/forschung/wissenschaftlicher-nachwuchs/postdoc-konzept/agnes-pockels-junior-fellowship> (Zugriff am 20.12.2020).
11. <https://www.livmats.uni-freiburg.de/en/career/agnes-pockels-jrg-program> (Zugriff am 20.12.2020) Thema: Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems.
12. <https://bunsen.de/auszeichnungen/ausschreibungen> (Zugriff am 20.12.2020).



13. (a) Klaus Beneke: Agnes (Luise Wilhelmine) Pockels. Forschende Hausfrau; bedeutende Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Grenz- und Oberflächenchemie, 2005, <https://www.unikiel.de/anorg/lagaly/group/klausSchiver/pockels.pdf> (Zugriff am 20.12.2020); (b) Klaus Beneke: Die Untersuchungen von Agnes Pockels. In: Zur Geschichte der Grenzflächenerscheinungen – mit ausgesuchten Beispielen. Beiträge zur Geschichte der Kolloidwissenschaften, IV. Mitteilungen der Kolloid-Gesellschaft 1995, Verlag Reinhard Knof, 40-43; (c) Elisabeth Pockels: Ein gelehrtes Geschwisterpaar. Zur Erinnerung an Agnes Pockels (1862-1935). Bericht der Oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde 24 (1949) 303-307; (d) Gabriele Beisswanger: Agnes Pockels (1862-1935) und die Oberflächenchemie. *ChiuZ* 25 (1991) 97-101, doi/epdf/10.1002/ciuz.19910250206; (e) Petra Mischnick: Agnes Pockels (1862-1935). *CHEMKON* 19 (2012) 78-82, doi: 10.1002/ckon.201210173; (f) Sonja Schwarzl, Andrea Kruse: Zum Beispiel Agnes Pockels. *Nachr. Chem.* 50 (2002) 759-760, <https://doi.org/10.1002/nadc.20020500638>; (g) Katharina Al-Shamery: Agnes Pockels (1862-1935), in *Women in Chemistry* (Eds. J. Apotheker, L.S. Sarkadi), Wiley-VCH, Weinheim 2011, S. 35-38; (h) Braunschweiger Frauen gestern und heute. Sechs Spaziergänge. Arbeitskreis Andere Geschichte e.V. Braunschweig 2002, S. 111-112; (i) Gabriele Armenat, *Frauen aus Braunschweig*, 3. erw. Auflage, Braunschweig 1991, S. 81-85.
14. Die Idee stammte von Prof. Dr. Henning Hopf.
15. <https://www.tu-braunschweig.de/agnes-pockels-labor> (Hier findet man auch das Team).
16. z.B. (a) BIOACID Broschüre: „Das andere CO₂-Problem“: Acht Experimente für Schüler und Lehrer; Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR); 2. Auflage, Januar 2012 <https://www.oceanacidification.de/category/downloads/> (Zugriff am 11.05.2020); (b) Ingo Mennerich, CO₂ und H₂O in der Atmosphäre – Experimente zum Treibhauseffekt. Arbeitshilfe Nr. 19.43, Hrsg: Landeshauptstadt Hannover, Fachbereich Biologie und Schule, überarb. Auflage 2007; (c) Richard M. Fuller, Greenhouse Effect Study Apparatus, Am. J. Phys. 41 (1973) 443. doi.101119/1.1987255.; (d) Paul Wagoner, Chunhua Liu, R.G. Tobin, Climate change in a shoebox: Right result, wrong physics. *Am. J. Phys.* 78 (2010) 536-540. doi.org/10.1119/1.3322738 und darin zitierte Arbeiten.
17. Svante Arrhenius, On the Influence on Carbonic Acid in the Air on the Temperature on the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science* 41 (1896) 237-276.
18. <https://www.uni-wuerzburg.de/uniairchiv/persoennlichkeiten/bedeutende-gelehrte/svante-arrhenius/>
Quelle: Armin Kübelbeck, Wikimedia Commons.
19. Elisabeth Crawford: Arrhenius. From Ionic Theory to the Greenhouse Effect. *Uppsala Studies in History of Science*, 23, 1996.
20. Helge Kragh, Svante Arrhenius, cosmical physicist and auroral theorist. *Hist. Geo. Space Sci.* 4 (2013) 61-69, doi.10.5194/hgss-4-61-2013.
21. Eunice Foote: Circumstances affecting the Heat of the Sun's Rays. In: *The American Journal of the Science and Arts*. 22 (1856) XXXI, 382-383. Zu Eunice Foote (1819-1888) s. auch https://de.wikipedia.org/wiki/Eunice_Newton_Foote (Zugriff am 27.12.2020): 1819-1888, US-amerikanische Erfinderin und Forscherin auf dem Gebiet der Atmosphärenchemie, die durch glückliche Umstände in New York naturwissenschaftliche Vorlesungen hören durfte. s. dazu auch Akshat Rathi: The female scientist who identified the greenhouse-gas effect never got the credit. In: *qz.com*. Quartz, Zugriff am 04.01.2021.
22. John Tyndall: *Further Researches on the Absorption and Radiation of Heat by Gaseous Matter*. Vorlesung gehalten vor der Royal Society, 30. Januar 1862. In: *Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat*. D. Appleton and Company, New York 1873. (zitiert nach https://de.wikipedia.org/wiki/Forschungsgeschichte_des_Klimawandels#John_Tyndall)



23. Klimawandelgeschichte: (a) Spencer Weart: *The Discovery of Global Warming*, Center of History am American Institute of Physics. <https://history.aip.org/climate/co2.htm> (Zugriff am 20.12.2020); (b) https://de.wikipedia.org/wiki/Forschungsgeschichte_des_Klimawandels (Zugriff am 14.12.2020)
24. <https://www.s4f-bs.org/>
25. An der Entwicklung der Versuche und Begleitmaterialien waren beteiligt: Dr. Christa Eggers, Ulrike Harnischmacher, Dr. Siegrid Philipp, Dr. Friederike Predöhl, Petra Schille.
26. „Integration neuer Medien in die MINT-Angebote des Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labors der TU Braunschweig - neue Versuche zum Thema Klimawandel“, gefördert in 2020 durch die Ecki Wohlgehagen Stiftung, treuhänderisch verwaltet durch die Braunschweiger Bürgerstiftung.
27. Manuel Wejner, Timm Wilke: Low Cost – High Tech: Die digitale Messstation LabPi. CHEMKON 7 (2019), 294-300.
28. Karl-Heinz Glaßmeier: Nach-Gedanken eines extraterrestrischen Physikers, dieser Band, S. 213-223.
29. Partnerschaft Erdsystemforschung, MPI für Biogeochemie, Jena, MPI für Chemie, Mainz, MPI für Meteorologie, Hamburg (Hrsg.), 2006. https://mpimet.mpg.de/fileadmin/communication/ESRP_d_low.pdf (Zugriff am 22.12.2020)
30. Aufgrund unterschiedlicher, nicht immer klar definierter Angaben nenne ich nur eine Größenordnung von ca. 30 %
31. SST sea surface temperature, zu Veränderungen s. https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Erw%C3%A4rmung_des_Ozeans (Zugriff am 31.12.2020).
32. Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser unter Bildung einer sauren Lösung. Kohlensäure existiert nur in Spuren. s. „Der Kohlensäure auf der Spur“. CHEMKON 18 (2011) 92.
33. https://de.wikipedia.org/wiki/Globale_Erwärmung (Zugriff am 28.07.2020)
34. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_kohlendioxid-konz_2020-06-24.pdf (Zugriff am 22.12.2020)
35. <https://bildungsserver.hamburg.de/treibhausgase/2056806/methan-quellen-und-senken/> (Zugriff am 19.12.2020)
36. <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/klimaforschung/wasserdampf/> (Zugriff am 26.12.2020)
37. Svante Arrhenius: Ueber die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte, *Naturwiss. Rundsch.* 5 (1890) 501-502.
38. Agnes Pockels: Das Willkürliche in der Welt, *Annalen der Naturphilosophie* 8 (1909) 321-328.
39. Svante August Arrhenius wurde als Sohn von Svante Georg Arrhenius (1813–1885) und seiner Frau Carolina Christina (geb. Thunberg) (1820–1906) geboren; https://de.wikipedia.org/wiki/Svante_Arrhenius (Zugriff am 27.12.2020). Es besteht eine weit entfernte Verwandtschaft mit Greta Thunberg.
40. <https://www.tu-braunschweig.de/check-in> (Zugriff am 04.01.2021)
41. (a) Katja Dartsch: „Das SchülerInnen-Labor der TU experimentiert jetzt auch online“, Braunschweiger Zeitung, 01.10.2020; (b) <https://magazin.tu-braunschweig.de/m-post/mit-digitalen-experimenten-die-region-erreichen/> (Zugriff 04.01.2021)